

論文 鋼材の腐食によるコンクリートのひび割れに関する解析的検討

川口 和広^{*1}・植木 博^{*2}・下西 勝^{*3}・村上 正明^{*4}

要旨: コンクリートが炭酸化し、鋼材に腐食が生じてコンクリートのひび割れに至る現象について数値解析モデルを構築し、鉄筋コンクリート構造物におけるかぶりコンクリートの剥離、剥落を防止するための補修時期を定量的に予測した。炭酸化解析で pH の低下する時期を求め、次に鉄筋周囲の遷移帯分布を考慮して、分散ひび割れモデルおよび離散ひび割れモデルを用いてひび割れ解析を行った。鉄筋コンクリート壁高欄に対してひび割れ発生時期とひび割れ幅を定量的に求めた結果、約 30 年で中性化が 20mm の深さまで進行し、鉄筋の腐食開始後、約 450 日でかぶりコンクリート表面に 0.2mm のひび割れが発生する結果が得られた。

キーワード: 中性化, 鉄筋腐食, 遷移帯, 侵食度, ひび割れ幅, pH

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性の検討に際しては、鉄筋の腐食状況を的確に把握することが重要となる。コンクリート中の強アルカリ環境下の鉄筋表面には、不動態皮膜と呼ばれる酸化皮膜が形成される。鉄筋は、この皮膜により水分や酸素から遮断されるために腐食が抑えられる。炭酸化などで鉄筋周辺コンクリートの空隙水の pH が低下すると不動態皮膜は破壊され、そこに水分や酸素が供給され腐食が始まる^(例えば 1)。腐食により鋼材の体積が増大すると、周囲のコンクリートに膨張圧が作用し、ひび割れが生じる。都市内高架道路においては、かぶりコンクリートの剥離・剥落により第三者被害が想定されるために、かぶりコンクリートを貫通するひび割れ発生時期とひび割れ性状の予測を定量的に行い、補修が必要となる時期を適切に予測することが、維持管理における大きな課題となってきた。

この背景の中、著者らはコンクリートの空隙構造を考慮した二酸化炭素の拡散と空隙水中の化学平衡に基づき pH を評価指標とした炭酸化反応モデルを提案した²⁾。さらに、鋼材腐食モデルと鋼

材周囲の遷移帯厚さを考慮にいたひび割れ解析を行い、かぶりコンクリートのひび割れの発生時期やひび割れ幅の検討を行ってきた³⁾。今回、これら解析手法の予測精度を上げるため、鉄筋周囲の遷移帯分布について、鋼材の配置による影響を考慮した非対称形状のモデルとした。これらの修正モデルを用いて、コンクリートの中性化からかぶりコンクリートのひび割れまで、一連の解析を行い、補修が必要となる時期を定量的に求めた。

2. コンクリートの炭酸化反応モデル

コンクリートの炭酸化反応モデルは、著者らの既報のモデル²⁾を用いた。本モデルは、配合、施工、および環境条件により変化する空隙構造をモデル化しており、空隙構造に依存する二酸化炭素の拡散係数を決定する物理モデルと、拡散した二酸化炭素が水酸化カルシウムなどの各種アルカリ成分と反応し空隙水中の各種イオンの化学平衡を考慮した化学モデルから成り立っている。

3. 鋼材の腐食モデル

鋼材の侵食度および腐食による体積膨張量のモデルには、筆者らの既報のモデル³⁾を用いた。

*1 JIP テクノサイエンス (株) 東京テクノセンタ事業開発部 (正会員)

*2 首都高速道路公団 東東京管理局保全部 (正会員)

*3 首都高速道路公団 保全施設部保全技術課 (正会員)

*4 JIP テクノサイエンス (株) 東京テクノセンタ事業開発部 (正会員)

コンクリート中の鋼材の侵食度は、コンクリートの品質や環境条件などにより変動が大きいと考えられる。本モデルでは、笹渕らの実験結果⁴⁾を参考にして安全側となるように、水溶液の pH によって規定される侵食度⁵⁾に対して実験定数 1/5 を乗じた値⁶⁾を用いた。本モデルで用いた侵食度と pH の関係を図-1 に示す。なお、鋼材の腐食には、腐食量が鋼材の円周方向で均一となるマイクロセル腐食と仮定しており、中性化領域が鋼材の表面に到達した時点で鋼材全周囲のコンクリートの pH が同一になると仮定している。また、侵食度のモデル化においては、腐食に必要な物質のうち、水分は空隙水の形で鋼材近傍に常に存在しており、また、酸素（気体）についても、腐食反応に必要な量が常に十分に存在するとした。

また、腐食生成物は鋼材表面に均一の厚さに生成され、軸方向には膨張しないと仮定し、鋼材の膨張量は須田ら⁷⁾の分析結果等から式(1)に示す体積膨張率 n を 3 としてモデル化した。

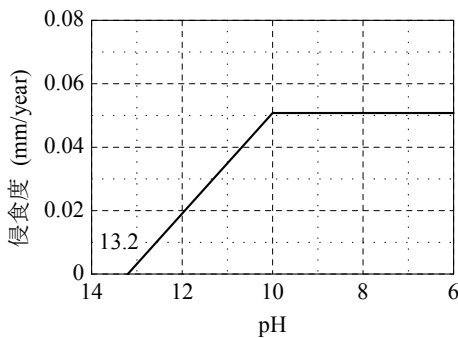


図-1 侵食度モデル

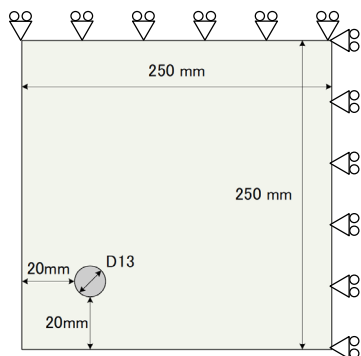


図-2 既設鉄筋コンクリート壁高欄の形状

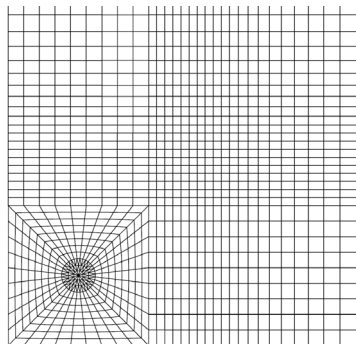


図-3 鋼材周辺要素分割
(分散モデル)

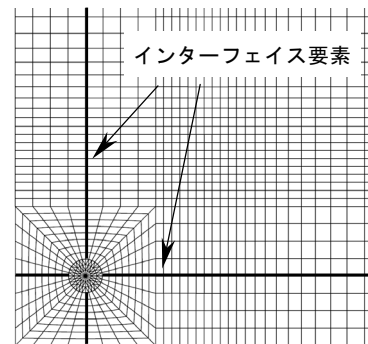


図-4 鋼材周辺要素分割
(離散モデル)

$$n = \frac{\phi_2^2 - \phi_1^2}{\phi^2 - \phi_1^2} \quad (1)$$

ここに、 ϕ : 腐食前の鋼材径 (mm)
 ϕ_1 : 腐食後の鋼材径 (mm)
 ϕ_2 : 腐食による鋼材膨張径 (mm)

4. ひび割れ解析モデルおよび解析条件

4.1 解析対象モデルと解析手法

解析対象は、コンクリートの剥離・剥落が顕在化している既設鉄筋コンクリート壁高欄とし、図-2のように壁高欄の隅角部を対象に使用鉄筋径 D13 ($\phi=12.7\text{mm}$) がかぶり厚 20mm で水平に配筋されているとした。

ひび割れ解析には、2次元有限要素法 (FEM) を用いた。コンクリート、および鋼材には平面ひずみ要素、また、鋼材周辺の遷移帯領域をモデル化するため、コンクリートと鋼材の節点間にはね要素を用いた。また、後述する離散ひび割れモデルでは、ひび割れ発生位置にコンクリート要素を結合するインターフェイス要素を用いた。インターフェイス要素の力学特性は、コンクリート要素間に生じる応力と相対変位の関係で表現される。

また、境界条件として、モデル上端の鉛直方向と右端の水平方向をそれぞれ拘束した (図-2)。

表-1にはコンクリートの配合条件を示す。

4.2 ひび割れ解析モデル

ひび割れ解析では、分散ひび割れモデル (多方向固定ひび割れモデル⁸⁾)、および、離散ひび割れモデルを用いた。

表-1 コンクリートの配合条件

| | |
|------------------------------|-----|
| 単位水量 (kg/m ³) | 167 |
| 単位セメント量 (kg/m ³) | 287 |
| 水セメント比 (%) | 58 |
| 乾燥開始材齢 (日) | 7 |
| 湿度 (%) | 70 |

多方向固定ひび割れモデルは、最大主応力が引張強度に達した場合に最大主応力の直角方向にひび割れが発生し、一度生じたひび割れ面の方向は変わらない。その後主応力方向が変わり、さらに引張強度に達した場合には複数のひび割れが発生するモデルである。離散ひび割れモデルは、予め発生するひび割れ面にインターフェイス要素を設定することによりひび割れの局所的な挙動を表現するモデルで、インターフェイス要素に生じる引張応力が引張強度を超えるとひび割れが発生するモデルである。各解析ケースの鋼材周辺の要素分割図を図-3、図-4に示す。

4.3 コンクリートの引張軟化特性

引張軟化曲線には、引張破壊エネルギーを考慮した 1/4 モデル⁹⁾を用いた (図-5)。また、引張強度 f_{tk} は設計基準強度 f'_{ck} に基づいた式(2)、式(3)から求めた⁹⁾。

$$f_{tk} = 0.23 \cdot f'_{ck}{}^{2/3} \quad (2)$$

$$G_F = 10(d_{max})^{1/3} \cdot f'_{ck}{}^{1/3} \quad (N/m) \quad (3)$$

ここに、 f'_{ck} : 設計基準強度 (N/mm²)
 d_{max} : 粗骨材の最大寸法 (mm)

図-5 に示すようなひび割れ幅との関係で表した引張軟化特性を要素の応力-ひずみ関係で表現

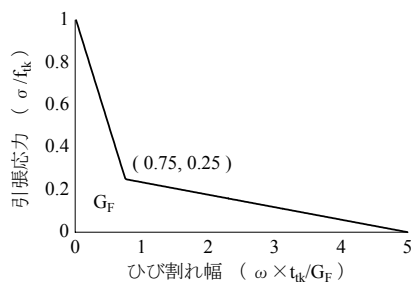


図-5 引張軟化曲線モデル

表-2 コンクリートの材料特性値

| | |
|-----------------------------|---------------------|
| ヤング係数 (N/mm ²) | 2.8×10 ⁴ |
| ポアソン比 | 0.2 |
| 設計基準強度 (N/mm ²) | 30 |
| 引張強度 (N/mm ²) | 2.22 |
| 粗骨材最大寸法 (mm) | 25 |
| 引張破壊エネルギー (N/mm) | 0.091 |

する分散ひび割れモデルに適用する場合、要素材料特性の定義において、ひび割れ幅をひずみに変換する必要がある。この変換には、式(4)に示すように、要素面積 A の 2 倍の平方根と定義した等価要素長さ l_{eq} を用いた⁸⁾。

$$l_{eq} = \sqrt{2A} \quad (4)$$

また、本解析に用いた材料特性には、本検討では解析予測モデルの検証を目的としているため、設計時の値を用いた (表-2)。

4.4 鋼材周辺の遷移帯のモデル化

粗骨材や鋼材の周辺では、ブリージング水, Wall Effect, One-side growth effect 等の要因により、多孔質で強度の弱い領域である遷移帯が形成されている。そのため、鋼材に腐食膨張が起こっても、すぐに周囲のコンクリートに膨張圧を伝達するのではなく、鋼材が遷移帯を押し広げながらコンクリートに力が伝達されると考えられる。そこで本モデルでは、遷移帯をばね要素でモデル化し、図-6 に示すように、鋼材とコンクリートの要素間の相対変位が遷移帯厚さ δ_t に達した後に膨張圧が伝達するモデルとした。なお、鋼材の膨張が遷移帯厚さ δ_t に達するまでの遷移帯の強度は、コン

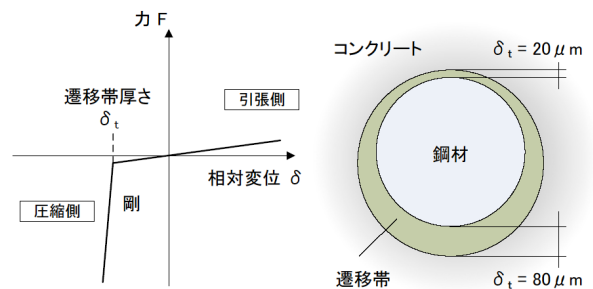


図-6 遷移帯ばね要素の特性モデル

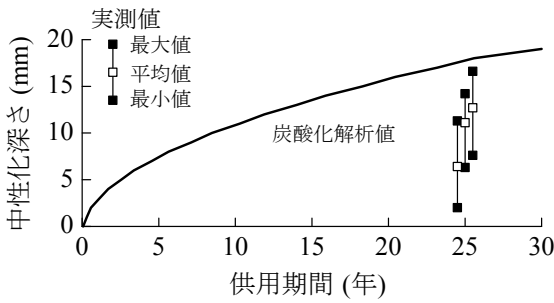


図-7 中性化深さの経時的変化

クリートと比較して十分小さいと仮定した。

遷移帯の領域は、配合、コンクリートの打設、配筋方向等によって変化すると考えられる。本モデルでは、水平鉄筋を対象にしていることから、鋼材の上面と下面で遷移帯厚さを変え、図-6に示すように鋼材の周方向に線形的に変化するとした。また、遷移帯厚さについては、大即らの研究¹⁰⁾を参考に、鋼材の上面には $\delta_i=20\mu\text{m}$ 、下面には $\delta_i=80\mu\text{m}$ と仮定した。

5. 解析結果と考察

5.1 コンクリートの炭酸化解析

炭酸化解析モデルによるコンクリートの中性化予測結果は、図-7に示す著者らの既報の1次元解析結果²⁾を用いた。解析結果の中性化深さは、30年で約20mmとなっている。この解析結果より、かぶり20mmの壁高欄に対する鋼材の腐食膨張の開始は、供用30年後とした。

5.2 鋼材侵食度および膨張速度の算出

鋼材の侵食度 r_c は、図-1のpHと侵食度の関係から読み取ることができ、炭酸化したコンクリートの解析結果平均値であった $\text{pH}=10.9$ では侵食度 $r_c=0.0365$ (mm/year)が得られる。

また、D13 ($\phi=12.7\text{mm}$) 鉄筋に対して、腐食生成物による体積膨張率 $n=3.0$ を適用すると、式(1)から鋼材の半径増分速度は以下の式から $r_d=0.20$ ($\mu\text{m/day}$)と算出できる。

$$\phi_2 = \sqrt{(1-n)\phi_1^2 + n\phi^2} \quad (1')$$

$$\phi_1 = \phi - 2r_c \quad (5)$$

$$\phi_2 = \phi + 2r_d \quad (6)$$

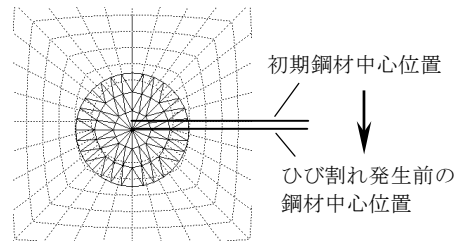
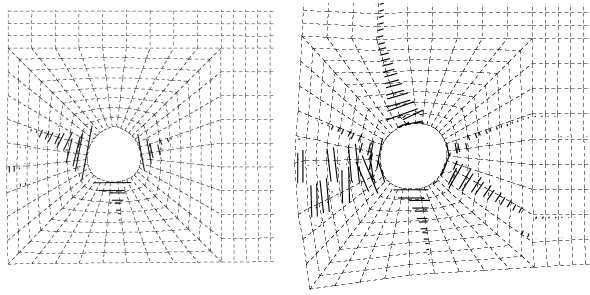


図-8 膨張に伴う鋼材中心位置の移動

5.3 腐食膨張によるひび割れ解析

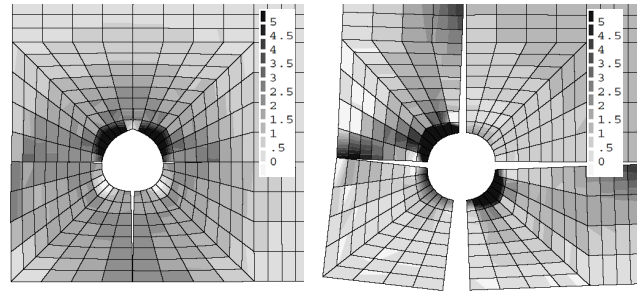
鋼材が膨張した後、ばね要素でモデル化した遷移帯を介してコンクリートへ膨張圧が作用するように、鋼材の全要素に平均的な膨張ひずみを与えて漸増解析を行った。モデル化した遷移帯領域は、鋼材上面よりも下面の方が広いため、腐食膨張に伴って鋼材の中心位置は図-8のように下方へ移動する。その後、腐食鋼材径が遷移帯領域を超えると、コンクリートに膨張圧が作用し引張応力が生じる。解析の結果、分散ひび割れモデルと離散ひび割れモデルの両解析ケースともに、コンクリートに膨張圧が伝達したのは、鋼材の半径増分 ΔR が $46.5\mu\text{m}$ (腐食開始後232日)の時であった。

図-9に、分散ひび割れモデルによる解析結果のひび割れひずみベクトル図を示す。ひび割れひずみベクトルは、ひび割れ面と直角方向を示し、その長さでひずみの大きさが確認できる。図-9(a)は、鋼材半径増分 $\Delta R=52.0\mu\text{m}$ 、腐食開始後260日での結果であり、内部から表面まで貫通したひび割れが生じ、コンクリート表面で幅 $1.0\mu\text{m}$ のひび割れが生じている。また、ひび割れは鋼材周辺から発生し、鋼材の左右方向、および鉛直下方向に進展していることが分かる。また、図-9(b)は、腐食が開始してから463日後 (鋼材半径増分 $\Delta R=92.6\mu\text{m}$)の結果である。鋼材周辺から発生した複数のひび割れが各方向に進展し、特に、表面に向かって水平に局所的なひび割れが進展し、変形が増大していることがわかる。この時のコンクリート表面におけるひび割れ幅は、樹脂注入等による補修が必要とされる 0.2mm に達している。分散ひび割れモデルによるひび割れひずみからは、ひび割れ間隔やひび割れ幅を評価することは困難



(a) 表面ひび割れ貫通時 (変形倍率 150) (b) 表面ひび割れ 0.2mm (変形倍率 30)

図-9 ひび割れひずみベクトル図 (分散モデル)



(a) 表面ひび割れ貫通時 (変形倍率 150) (b) 表面ひび割れ 0.2mm (変形倍率 30)

図-10 最大主応力コンター図 (離散モデル)

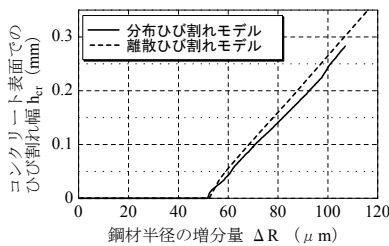


図-11 鋼材膨張半径とひび割れ幅の関係

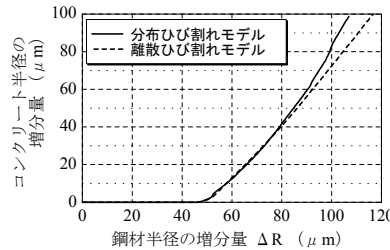


図-12 鋼材膨張半径とコンクリート半径増分の関係

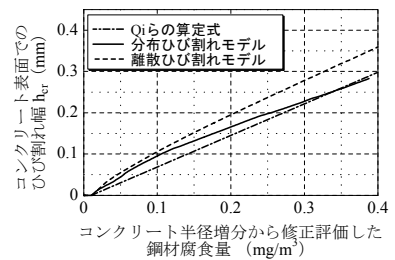


図-13 腐食量とひび割れ幅の関係

であるとされるが、図-9に見られるように、表面でのひび割れは1つの要素に局部的にひび割れが発生しており、その要素に1本の局部的なひび割れが生じたと考え、該当要素の平均ひび割れひずみに等価要素長さ $l_{eq}=5.6\text{mm}$ (式(4)) を乗じてひび割れ幅を評価した。

図-10には、離散ひび割れモデルによる解析結果の最大主応力コンター図を示す。インターフェイス要素でモデル化したひび割れ位置は、分散ひび割れモデルの解析結果から、鋼材中心から水平および鉛直方向とした。図-10(a)は、コンクリート表面に内部から貫通したひび割れ(ひび割れ幅 $1.0\mu\text{m}$)が生じた鋼材半径増分 $\Delta R=52.5\mu\text{m}$ 、腐食開始後263日での結果である。ひび割れが表面まで貫通した鋼材半径増分は、分散ひび割れモデルの結果とほぼ同じであった。しかし、表面まで貫通したのは、分散ひび割れモデルでは水平方向であったのに対し、離散ひび割れモデルでは鉛直下向きであった。今回の隅角部のモデルでは、鋼材左側と下側でのかぶりコンクリート厚さが同じであるため、数値的誤差に伴う僅かな応力分布の

違いでひび割れ進展方向の違いが生じたと考えられる。

図-10(b)は、表面ひび割れ幅が 0.2mm となった鋼材半径増分 $\Delta R=87.7\mu\text{m}$ 、腐食開始後439日での結果を示す。鋼材から各方向にひび割れが発生しており、また、鉛直下方向に貫通したひび割れは大きく開口し、それに伴い変形が増大していることが分かる。

図-11は、分布ひび割れモデルおよび離散ひび割れモデルによる解析に対して、鋼材の半径増分とコンクリート表面でのひび割れ幅の変化を示している。2モデルともほぼ同様の関係が得られており、鋼材膨張半径が約 $52\mu\text{m}$ から表面にひび割れが発生し、その後、ひび割れ幅は線形的に増大し、表面に 0.2mm のひび割れ幅が生じるのは、鋼材半径増分が約 $90\mu\text{m}$ であることが予測できた。

すなわち、中性化深さが 20mm に達し、鋼材周辺の pH が低下し鋼材が腐食し始めると、コンクリート表面に貫通するひび割れが生じるのは腐食開始後から約260日後、供用期間30.7年であり、また、補修が必要とされる表面ひび割れ幅が

0.2mm に達するのは、腐食開始から約 450 日、供用期間 31.2 年であることが解析的に予測できた。

ここで、鋼材の腐食膨張によるひび割れ幅の評価について多くの研究が為されているが^{例えば 11)}、それらの多くは鋼材の膨張を鋼材に接するコンクリート要素の節点に一様に強制変位を与えている。本解析では、鋼材に膨張ひずみを与え、コンクリートは鋼材の膨張が遷移帯領域を超えた後に変形するモデルとしており、また、コンクリートに発生したひび割れの影響により、鋼材の半径増分とコンクリートの変位増分は異なる値となる。そこで、図-12 には、鋼材半径増分と、隅角部から 45 度の方向において鋼材と接するコンクリートの半径増分量の関係を示す。

ここで、実験結果との検証が行われている^{元ら}による鋼材腐食量とひび割れ幅の算定式¹¹⁾と本解析結果との比較を試みた。式(7)に示す^{元ら}による算定式では、鋼材半径の増分厚さ u を変数としているが、本解析結果との比較検討の際には、変数 u に対して図-12 に示すコンクリートの半径増分を用いた。図-13 に両者の結果を示す。

分散ひび割れモデルと離散ひび割れモデルによる解析結果は、いずれも^{元ら}の算定式と概ね一致していることが確認できた。

$$W_c = \frac{\gamma}{(n-1)}u \quad (7)$$

ここに、 W_c : 鋼材腐食量 (mg/mm²)
 u : 鋼材半径の増分厚さ(mm)
 γ : 鋼の密度 (7.85mg/mm³)

6. まとめ

鉄筋コンクリート壁高欄を対象に炭酸化反応、鋼材の腐食膨張、コンクリートのひび割れについての一連の数値解析モデルを構築し、コンクリートが剥離・剥落を防止するための補修時期を定量的に予測した。

今後は、首都高速道路での車線拡幅工事等に伴い撤去した鉄筋コンクリート壁高欄等からサンプルを採取して得られた侵食度を用い、実測値等と

の比較検討を行い、本解析モデルの精度の向上を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向，土木学会コンクリート技術シリーズ 26，1997
- 2) 植木博・後藤孝治・村上正明・益子直人：空隙構造と化学平衡を考慮したコンクリートの炭酸化反応モデル，コンクリート工学論文集 第 13 巻第 3 号，2002.9
- 3) 村上正明・川口和広・植木博・増井隆：鋼材の腐食によるコンクリートのひび割れ解析モデルの構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，2004
- 4) 笹淵優樹・榊田佳寛・中村成春：塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する暴露試験，コンクリート年次論文報告集，Vol.20，No.1，1998
- 5) Herbert H. Uhlig and R. Winston Revie: Corrosion and Corrosion Control, John Wiley & Sons, Inc, 1985
- 6) 小林悟志・下村匠：コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，2002
- 7) 須田久美子・Misra Sudhir・本橋賢一：腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，1992
- 8) J.G.Rots:Computational Modeling of Concrete Fracture, PhD thesis, Delft University of Technology, 1988
- 9) 土木学会，2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査型] pp.21~27, 2002.3
- 10) Nobuaki OTSUKI, Makoto HISADA, Nathaniel B.DIOLA and Tarek UDDIN Md. : Experimental Study on Interfacial Transition Zones in Reinforced Concrete, J.Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.529/V-39, 155-167, 1998.5
- 11) 元 路寛・関 博：鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究，土木学会論文集 No.669/V-50, 161-171, 2001.2